

柱状構造物の波浪応答解析と現地観測

花村 哲也*・田中 良弘*・大坂 一**

1. ま え が き

従来、柱状構造物に対するいくつかの波浪解析手法が提案されてきたが、これらの理論検証として、模型実験による研究報告はいくつかみられるが、現地観測による結果と対比した報告事例は、余りないと思われる。

本研究は、大水深の柱状構造物の設計法確立の一貫として、既存の構造物の現地観測を行い、各種波浪応答の理論解析結果と比較し、実測値の評価および各種解析法の特徴の把握や適用性の限界、および波力の非線型性の影響の評価を行ったものである。

2. 波浪応答解析

(1) 解析法の概要

柱状構造物に対する波浪による動的解析手法は、波の不規則性、波力における抗力項の非線型性あるいは、対象構造物の相連等の問題をどこまで取り扱うかによりいろいろ考えられる。ここでは、従来行われて来た、Harleman や Penzien あるいは Burke らの研究成果をもとに、計算過程で若干の工夫をこらして、表-1 に示すような4つの手法を考え、現地観測データに基づく波浪応答計算を行った。

(2) 規則波浪等価1質点系解析(H-1)

この方法は、ドルフィンのような構造物の振動モデルとして、図-1 に示すような等価1質点系モデルに置き換えて計算する。この場合の運動方程式は式(1)のよう

になり、波力はフーリエ級数で表わされるとしてモデルの質点に働く等価水平力 P_m の各級数項を求め、定常応答変位を求める。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P_m \sin \omega t \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 M ：等価系の有効質量、 C ：構造物の減衰係数、 K ：等価系のばね定数、 P_m ：等価水平力、 ω ：波の円振動数、 x ：上部工の変位

(3) 等価1質点系スペクトル解析(H-3)

この方法も図-1に示すような等価1質点系を考え、波力は Morison の式を適用するが、非線型項である抗力項は無視する。つまり、 N 本の杭からなる構造物の高さ z での単位長当りに働く波力は式(2)で表わされる。

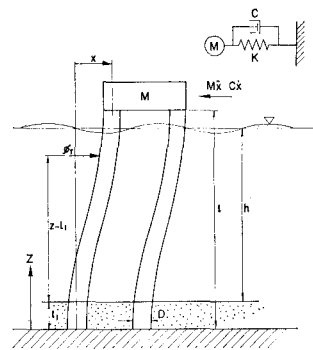


図-1 等価1質点系モデル図

表-1 解析手法の一覧

記号	波 浪	解 析 法	振動モデル	特 徴 お よ び 出 力	対比構造物	関 連 論 文
H-1	規 則 波	定常応答解析	等価1質点系	微小振幅波、3次ストークス波による定常応答変位、波力(1周期分)	三脚ドルフィン	Harleman ^{5), 6)}
H-3	不規則波	スペクトル解析	等価1質点系	抗力非線型項無視、変位応答スペクトル伝達関数、多柱列伝達関数	三脚ドルフィン	Borgman ²⁾ Nath, Harleman ¹⁰⁾
H-4	不規則波	スペクトル解析	多 質 点 系	抗力非線型項の最小自乗法による線型化、固有値、変形モード図、変位およびモーメント応答スペクトル	三脚ドルフィン ジャケット	Berge, Penzien ¹⁾ Malhotra, Penzien ^{8), 9)}
H-5	不規則波	シミュレーション	等価1質点系	逐次計算による時系列モデル、波高、波力、応答変位	三脚ドルフィン	Burke, Tighe ⁴⁾ Borgman ³⁾ 伊藤他 ⁷⁾

* 正会員 大成建設(株)技術開発部

** 正会員 大成建設(株)電子計算センター

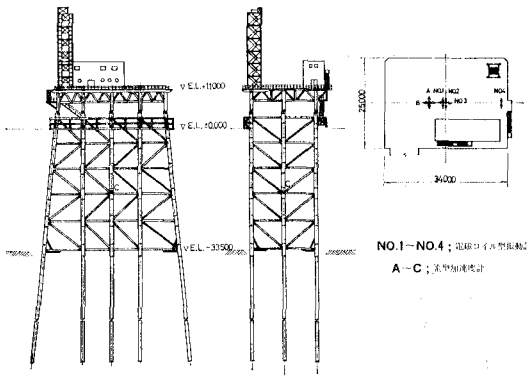


図-4 ジャケット計測器配置図

て、各方向の応答変位と応答加速度をデータレコーダーおよび電磁オシログラフに各7分間記録した。波高は、三脚ドルフィンの杭に直読式波高計を設置して20分間測定した。

さらに、対象構造物の固有振動数と減衰定数を調べるため、波が静穏な時に船による衝突を与えて、自由減衰振動試験を行った¹¹⁾。

(2) 観測結果

波浪データよりパワースペクトルを求めたものが図-5であり、卓越周期は7.6秒、波高の標準偏差 η_{rms} は26.7 cmであった。また、平均波法により有義波高、周期は105 cm, 7.3秒、平均波高、周期は73 cm, 7.0秒であった。一方、自由振動試験の結果よりドルフィンの固有周期、減衰定数は1.47秒, 0.068であり、ジャケットの平面短軸方向で0.74秒, 0.072, 平面長軸方向で0.64秒, 0.064であった。

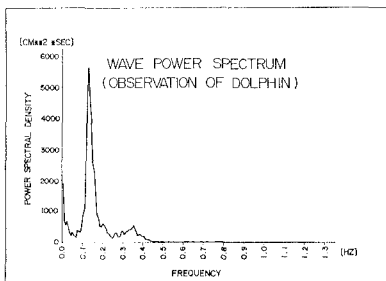


図-5 実測波浪スペクトル図

4. 現地観測と計算の比較

(1) 三脚ドルフィン

a) 規則波浪等価1質点系解析(H-1)との比較

杭の水平載荷試験を行い、静的な横方向地盤反力係数 $K_h = 1.0 \text{ kg/cm}^3$ を求めた。ばねの動的效果を考慮し、計算値として $K_h = 2.0 \text{ kg/cm}^3$ とした。杭の固定点として Chang の第1不動点を用いた。等価系の有効質量に

は、杭の付加質量(係数 1.0)を加えた。以上の条件より計算した結果、固有周期は1.48秒であった。応答計算には、有義波高、周期を、減衰係数には自由振動結果を用い、また、 $C_M = 2.0$, $C_D = 1.0$ を用いた。結果は、両振幅で11.0 mmであった。一方、実測結果の変位波形は図-9に示されており、平均波法による処理結果は、有義変位で10.8 mm, 平均変位7.0 mm, 最大変位14.9 mmであった。変位の標準偏差 x_{rms} は3.0 mmであり、波浪における $H_{1/3} \approx 4 \times \eta_{rms}$ の関係と同じように、変位についても $x_{1/3} \approx 4 \times x_{rms}$ がほぼ成立した。

b) 等価1質点系スペクトル解析(H-3)との比較
規則波応答計算と同じ杭、地盤条件により計算を行った。図-5の波浪スペクトルと式(5)による伝達関数より、図-6の応答変位スペクトルを求めた。図中の一点鎖線は C_M を D/L の関数として求めたものである。0.13 Hz 付近の応答は波浪によるものを示し、0.68 Hz の応答は固有振動によるもの、0.35~0.4 Hz のピークは図-7の柱列伝達関数 $T_{MP}^{(V)}$ によるものと考えられる。図-7の実線は、波の観測方向の伝達関数を示し、0.35~0.4 Hz の変位応答振動数と一致している。

c) 多質点系スペクトル解析(H-4)との比較

ドルフィンを24個の質点でモデル化した。ばね $K_h = 2.0 \text{ kg/cm}^3$ を用いて固有周期を求めた結果、1次周期で1.47秒、2次周期で0.31秒であった。 $C_M = 2.0$, $C_D = 1.0$ とし、2次までの変形モードを合成して応答スペクトルを計算したものが図-8である。H-3による結果(図-6)と良く一致している。

d) 等価1質点系シミュレーション解析(H-5)との

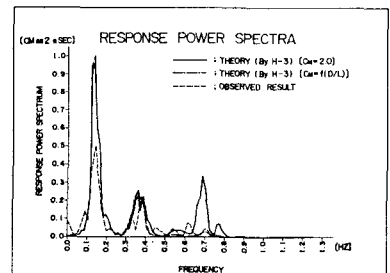


図-6 (H-3) および実測による応答スペクトル図

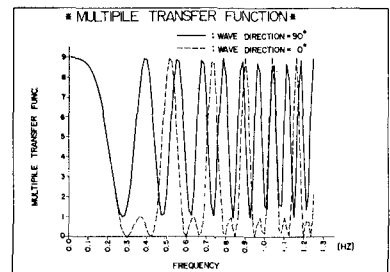


図-7 多柱列伝達関数

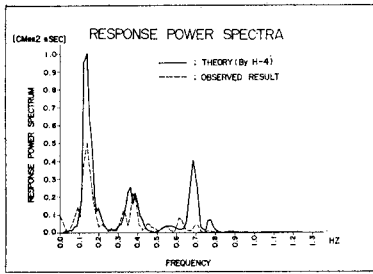


図-8 (H-4) および実測による応答スペクトル図

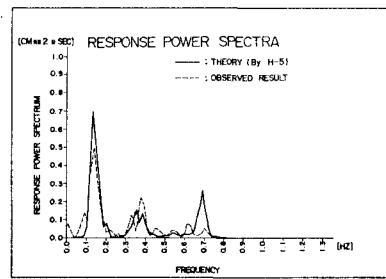


図-10 (H-5) および実測による応答スペクトル図

比較

図-5 の実測波浪スペクトルより、式 (8) を用いて 100 等分し、時間間隔 0.5 秒でシミュレートしたものが、図-9 の時系列波高と波力である。波力は、慣性力、抗力に分離されているが、この場合、慣性力が圧倒している。さらに、波力を 0.1 秒間隔で逐次応答計算を行った結果が図-9 の時系列変位応答曲線である。最下段は実測変位曲線で、シミュレーション結果と比較される。シミュレーション結果は、初期 30 秒ほどは、初期条件 $x=\dot{x}=0$ の影響が現われている。シミュレーション時間 256 秒分のデータより変位応答パワースペクトルを求めた結果が図-10 である。H-3, H-4 の結果とよく一致している。

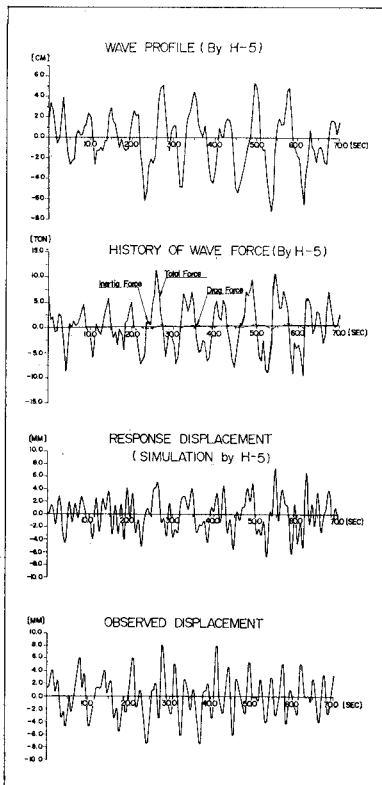


図-9 (H-5) による計算結果および実測応答変位

(2) ジャケット

図-11 に示す 40 個の質点でモデル化した。ばねを $K_h=2.0 \text{ kg/cm}^3$ 、付加質量係数を 1.0 として固有周期を計算した結果、1 次周期 0.75 秒、2 次周期 0.24 秒を得た。これは、自由振動試験結果の固有周期 0.74 秒と良く一致した。図-11 の右側部は変形モード図である。

$C_M=2.0$, $C_D=1.0$ とし、波の進行直角方向の水平材、斜材の波力を考慮し、応答変位スペクトルを計算した結果が図-12 である。計算値の方が、実測値に比べ大きく、観測時の固有周期による応答は、1.43 Hz 付近に大きく出しており、計算値とずれている。0.2 Hz 以下で計算値が大きく応答を示しているが、実測値は小さく出ている。これは、一つに、計測器の問題があり、周波数特性は、0.5 Hz で 70%, 0.2 Hz 以下で 0% となる結果と考えられる。

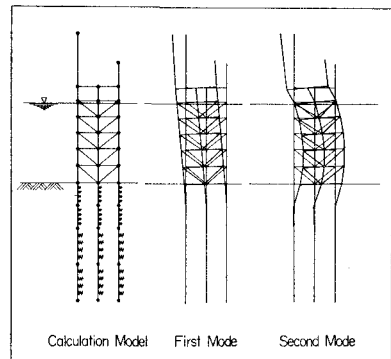


図-11 ジャケットの振動モデルおよび変形モード図

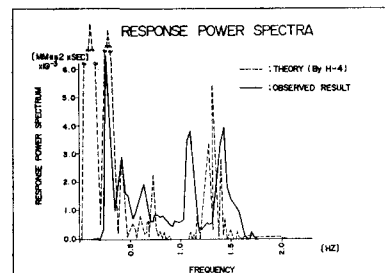


図-12 (H-4) および実測による応答スペクトル図

最後に、実測と各解析法による応答の標準偏差を表-2にまとめた。

表-2 現地観測と各解析法による応答の標準偏差

	現地観測と各解析法	標準偏差 σ _{r.m.s.} (mm)
三脚ドルフィン	現地観測	3.0
	1質点スペクトル (H-3), $C_M=2.0$	4.4
	1質点スペクトル (H-3), $C_M=f(D/L)$	3.8
	多質点スペクトル (H-4)	3.7
	1質点シミュレーション (H-5)	3.1
ジャケツト	現地観測	0.065
	多質点スペクトル (H-4)	0.120

5. 抗力項の影響の検討

抗力非線項を検討するため、抗力項を無視した H-3 と等価線型法により抗力項を考慮した H-4 の両方でのような相違が生ずるか計算してみる。抗力の最大値と慣性力の最大値が等しいときの H/D と h/L の関係を図-13に示す。点 [A] は慣性力が抗力が同程度の場合で、点 [B] は慣性力が支配的な場合で、この条件は同一構造条件で波高を考えることにより得られる。構造条件は、表-3に示す通りで、点 [A] は波高 3m また点 [B] は波高 1m であり、この場合の波浪としては、有義波高が 3m ないし 1m の場合の Pierson-Moskowitz の波浪スペクトルを入力した。その結果を図-14に示す。これより、抗力項は長周期の側で波力として働いていることがわかる。

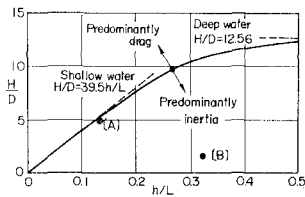


図-13 抗力と慣性力の支配領域図

表-3 比較計算のための構造条件

鋼管杭 (直径×肉厚×杭長)	φ 600×30 t+34 000 t
地盤の横方向反力係数 K_h	2.0 kg/cm ³
上部工重量 W	200 ton
水深 h	12 m
杭間隔 (本数) B	5 m (2 本)
減衰定数 ζ	0.05

6. 結 論

(1) 現地観測結果と種々の理論解析結果は、周波数的にみると良い一致を示しているが、応答量についてみると理論解析の方がやや大きくなった。これは、理論解析では波浪の入射方向を一方のみしか考えていない

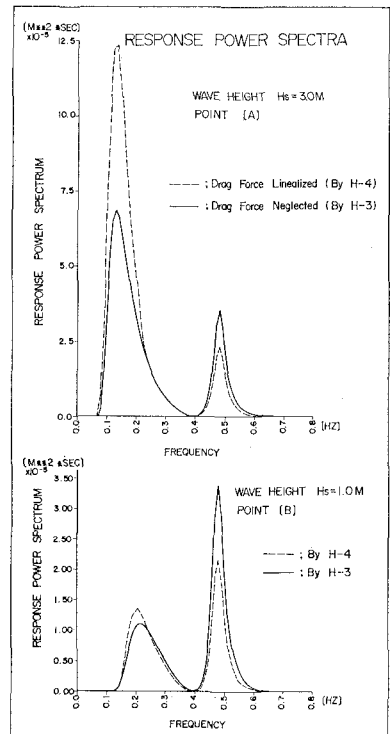


図-14 $H_s=1\text{m}$ および $H_s=3\text{m}$ のときの
応答スペクトル図

のに対して、実際の応答は一方だけにしておくのではなく、理論では考えていない方向にも立体的に変位するためでありエネルギーの分散化によるものと考えられる。

(2) 等価1質点系モデルによる解析手法は、ドルフィンタイプのような頭部の重量が重い構造物に対しては、計算のモデル化が簡単で実測とも良い一致を示しているため、有効な方法といえる。

(3) 規則波等価1質点系解析において、有義波浪による計算結果は、実測における有義応答量と良い一致を示した。

(4) シミュレーション法による解析手法は、水位変動に対応する波力および応答変位量が時系列で得られるという点で、良い方法であると思われるが、波力の逐次計算において計算時間が長くなるという欠点を有する。

(5) ジャケットタイプのような斜材や水平材の多い構造物に対しては、多質点系モデルによる解析が有効であるが斜材や水平材に働く波力の算定法に問題がある。また、実際には部材による遮蔽効果が生じていると思われるが理論計算で遮蔽効果を考慮するのは困難である。

(6) 水深や波浪条件により、抗力項が卓越してくると、抗力項の非線型性を無視する場合に比べ、非線型性を考慮すると、長周期側で大きな応答量を示すようになる。

(7) 現地観測において、長周期の応答を正確に実測することは、計器の特性上困難であり、今後の実測技術における開発が望まれる。

参 考 文 献

- 1) Berge, B. and J. Penzien: Three dimensional stochastic response of offshore towers to wave forces, Offshore Technology Conf., OTC-2050, 1974.
- 2) Borgman, L.E.: Spectra analysis of ocean wave forces on piling, Jour. Waterways and Harbors Div., Proc. ASCE., Vol. 93, No. WW 2, 1967.
- 3) Borgman, L.E.: Ocean wave simulation for engineering design, Jour. Waterways and Harbors Div., Proc. ASCE., Vol. 95, No. WW 4, 1969.
- 4) Burke, B.G. and J.T. Tighe: A time series model for dynamic behavior of offshore structures, Offshore Technology Conf., OTC-1403, 1971.
- 5) Harleman, D.R.F., Nolan and Honsinger: Dynamic analysis of offshore structures, Proc. 8th Conf. on Coastal Eng., pp. 482-499, 1962.
- 6) Ippen, A.T.: Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw Hill Inc. New York, pp. 341~403, 1966.
- 7) 伊藤喜行・谷本勝利・小舟浩治: 柱状構造物応答計算, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第3号, 1972年9月.
- 8) Malhotra, A.K. and J. Penzien: Nondeterministic analysis of offshore structures, Jour. Eng. Mech. Div., Proc. ASCE, Vol. 96, No. EM 3, Dec. 1970.
- 9) Malhotra, A.K. and J. Penzien: Response of offshore structures to random wave forces, Jour. Structural Div., Proc. ASCE, Vol. 96, No. ST10, Oct. 1970.
- 10) Nath, J.H. and D.R.F. Harleman: The Dynamic Response of Fixed Offshore Structures to Periodic and Random Waves, MIT Hydrodynamic Laboratory Report No. 102, MIT, Cambridge Mass., Jan. 1967.
- 11) 田口正孝・田中良弘: 柱状構造物の不規則波浪による動的応答, 土木学会年次学術講演会概要集, II-33, 1975.